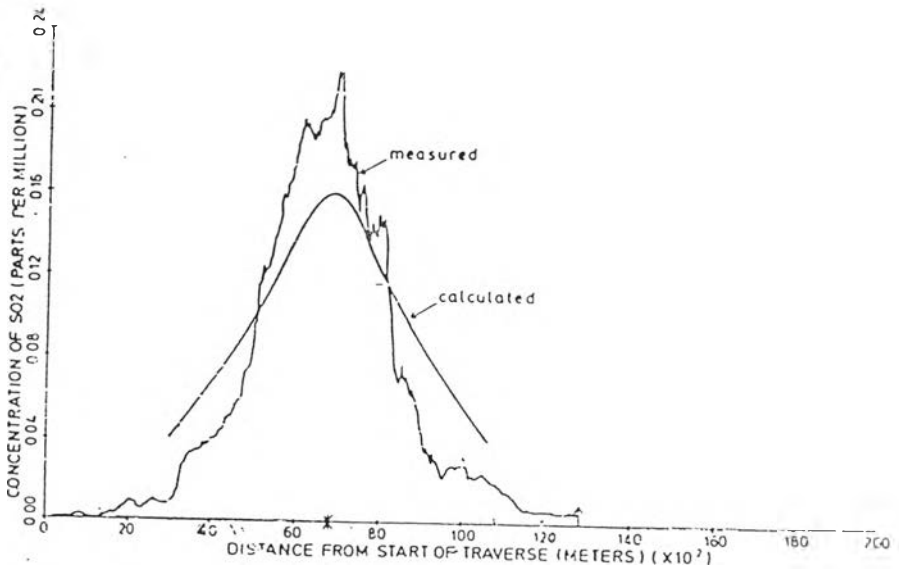
บทที่ 2

งานวิจัยที่ผ่านมา

ได้มีการศึกษาการกระจายตัวของสารมลพิษที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดสู่บรรยากาศ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อประเมินการกระจายความเข้มข้นของสารมลพิษที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ ตัวอย่างของแบบจำลองที่มีผู้เคยทำการศึกษามีดังนี้

Leif Enger (1990) ใช้แบบจำลอง Operational ซึ่งใช้หลักการการกระจายตัวของเกาส์เซียน (Gaussian distribution) และ กลศาสตร์การไหลของของไหล เพื่อหาการกระจายความเข้มข้นของก๊าซมลพิษในบริเวณภูมิประเทศแบบซับซ้อน ข้อมูลที่ต้องการใช้ได้แก่ ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลของลักษณะภูมิประเทศ โดยเฉพาะข้อมูลของความเร็วและทิศทางลม และข้อมูลเกี่ยวกับระยะผสม (mixing height) แบบจำลองนี้ใช้คำนวณแนวของเส้นผ่านศูนย์กลางของพลูม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้งแนวตั้ง และแนวนอน คำนวณได้จากค่าความปั่นป่วนจากแบบจำลองการเคลื่อนที่ แบบจำลองนี้นำมาเปรียบเทียบกับการวัดการกระจายตัวความเข้มข้นในบริเวณตอนใต้ของประเทศสวีเดน ขั้นตอนของการใช้แบบจำลองนี้ ได้แก่ การใช้แบบจำลองเพื่อหาการเคลื่อนที่ของลม และกระแสความปั่นป่วน รวมทั้งข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา จากนั้น คำนวณหาค่าการกระจายตัวโดยใช้ข้อมูลความเร็วและทิศทางลม รวมทั้งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้งในแนวตั้ง และแนวนอน แล้วนำค่าต่างๆ ที่คำนวณได้มาทำการคำนวณหาความเข้มข้นของอากาศ โดยใช้หลักการทางสถิติ

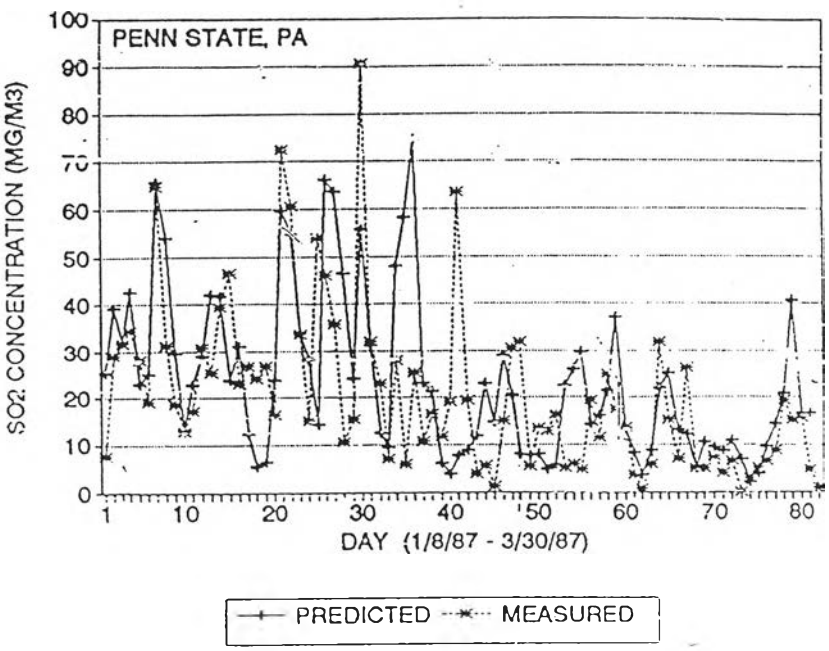
D.P. Eppel, G. Petersen, P.K. Misra และ R. Bloxam (1990) นำแบบจำลอง MODIS (Momentum Distribution) เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของก๊าซมลพิษที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำนิด 1 แหล่ง ซึ่งโดยปกติบริเวณใกล้พื้นดิน จะมีการไหลแบบปั่นป่วนมาก ดังนั้นทำให้ยากต่อการทำนายการเคลื่อนที่ของก๊าซมลพิษ เรียกบริเวณนี้ว่า Convective Boundary Layer (CBL) แต่แบบจำลอง MODIS สามารถนำมาใช้จำลองการเคลื่อนที่ของก๊าซมลพิษในบริเวณนี้ได้ โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ ซึ่งกำหนดว่า ก๊าซมลพิษไม่มีการสะสมที่ระดับพื้นดิน ผลการคำนวณหาการกระจายตัวของก๊าซมลพิศ ซึ่งทำการวัดที่ Sudbury ประเทศแคนาดา เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงพบว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงผลการวัดและการคำนวณความเข้มข้นของก๊าซมลพิษ ณ บริเวณ Sudbury ระยะห่างจากปล่อง 12.8 กม. ที่ความสูง 30 เมตรเหนือระดับพื้นดิน ในวันที่ 20 มิถุนายน 1978

Glenn D. Ralph, Roland R. Draxler และ Rosa G. Depena (1991) ใช้แบบจำลอง HY-SPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integration Trajectory) เป็นแบบจำลองที่นำมาใช้ในการหาค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และอนุภาคซัลเฟอร์ที่ถูกออกซิไดซ์มาจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่พิจารณาแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) และพิจารณาค่าเฉลี่ยในช่วง 24 ชั่วโมง ซึ่งแบ่งการคำนวณเป็นกริด (grid) ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจาก National Oceanic and Atmospheric Administration/Air Resources Laboratory ซึ่งแบบจำลองนี้ มีแนวโน้มที่จะทำนายค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง แต่ค่าทำนายความเข้มข้นของซัลเฟตมีแนวโน้มว่าจะสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง

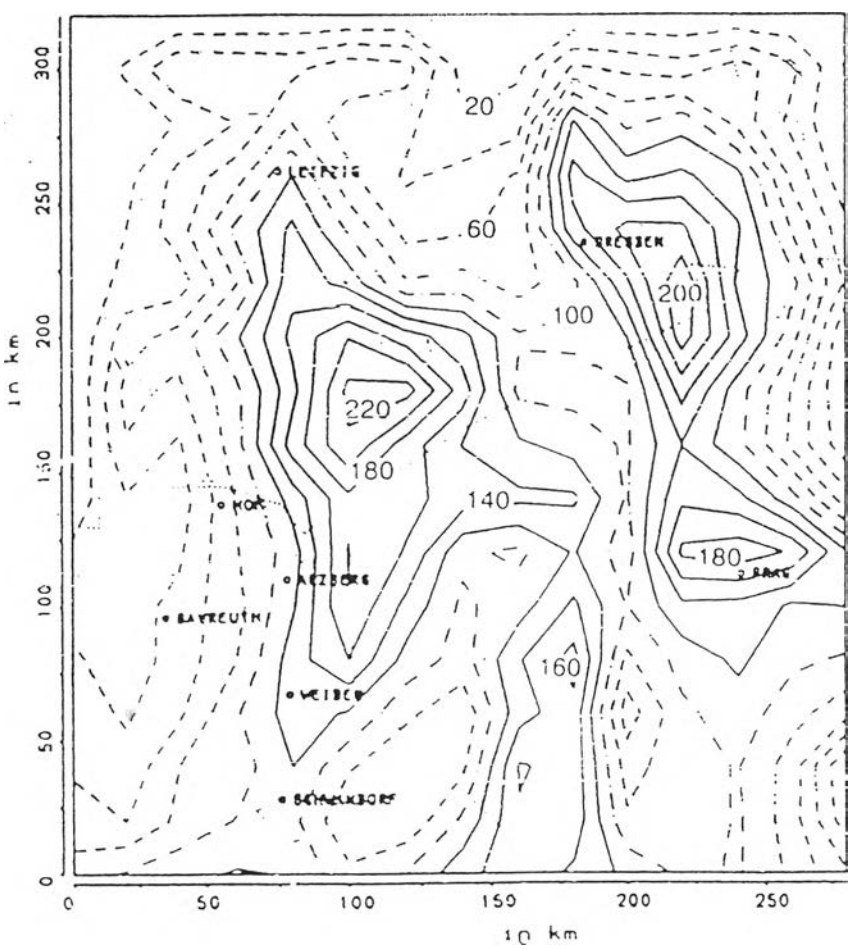
หลักการของแบบจำลอง HY-SPLIT นี้ ใช้หลักการของ Eulerian และ Lagrangian โดยที่มีสมมติฐานว่า อนุภาคเคลื่อนที่ไปตามลม การคำนวณความเข้มข้นทั้งเวลากลางวันและกลางคืน ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ความสูงของการผสม กับการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง เทคนิคการคำนวณ ใช้หลักการ PIC (Particle-in-cell) ซึ่งสมมติหาค่าการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค ซึ่งมีอิสระในการไหล ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริง เป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม HY-SPLIT และที่ได้จากการวัดที่ PENN STATE, PA

Sybilla Schmid (1991) นำแบบจำลอง REWIMET เพื่อทำนายความเร็วลม และความปั่นป่วน โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ของก๊าซมลพิษ แบบจำลองนี้ใช้สมการนาเวียร์-สโตคส์ (Navier-Stokes) ในบริเวณที่เป็น non-slip condition (v = 0) แบบจำลองบรรยากาศ แบ่งเป็น 3 ชั้น โดยชั้น

แรกได้แก่บริเวณพื้นผิวโลก มีความหนาประมาณ 50 เมตร ชั้นถัดมาสูงเท่ากับชั้นบรรยากาศโลก (Atmospheric Boundary Layer; ABL) และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นบรรยากาศเปิด ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม ประกอบด้วย ข้อมูลทางภูมิประเทศของบริเวณที่ทำการศึกษา ตลอดจนข้อมูลความสูงต่ำของภูมิประเทศ ความขรุขระ (roughness) ซึ่งศึกษาบริเวณโดเมน 20x20 ตารางกิโลเมตร ข้อมูลการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ความเร็วลม โพรไฟล์ของอุณหภูมิในแนวตั้ง อุณหภูมิที่พื้นผิว ข้อมูลการสะสมของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่พื้นดิน ผลการจำลองความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และความสูงของภูมิประเทศที่คำนวณโดยแบบจำลอง REWIMET เส้นทึบแสดงถึงค่าความเข้มข้นสูง เส้นประแสดงถึงค่าความเข้มข้นต่ำ

Liya E.Yu, Lynn M.Hildermann และ Wayne R.Ott (1996) นำโปรแกรม STREET (Stanford Trends in Roadway Emissions and Exposures with Time) มาศึกษาปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ถูกปล่อยจากถนนและภาคการจราจร ซึ่งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ใช้เพื่อทำนายการปล่อยของก๊าซดังกล่าวในบริเวณที่สนใจทำการศึกษาได้แก่ ทำนายอัตราการปล่อยก๊าซมลพิษในบริเวณทางด่วนตอนเหนือของรัฐแคลิฟอร์เนียร์ โปรแกรมนี้ ใช้ทำนายก๊าซที่ปล่อยในปี 1980-1981 1991-1992 และ 2002-2003 ซึ่งใช้ทำนายแนวโน้มความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในช่วงปี 1980-1991 ค่าที่ประมาณได้ ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงจากเทศบาลของรัฐแคลิฟอร์เนียร์ นอกจากนี้ โปรแกรมนี้ใช้ทำนายแนวโน้มความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอนาคต ระหว่างปี 2002-2003 ซึ่งพบว่าจะมีแนวโน้มน้อยลง อาจเนื่องจากการพัฒนาการใช้เครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

Frooz Rasouli และ Ted A. William (1995) นำแบบจำลองที่อาศัยหลักการ และสมการกลศาสตร์การไหลของของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) ซึ่งใช้สมการอนุรักษ์ 3 สมการได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass; Continuity equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier-Stokes equation) และ สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ซึ่งสมการอนุรักษ์พลังงานและมวล มีเทอมที่เป็นทั้งการนำและการแพร่ (Convective and Diffusion term) แบบจำลองดังกล่าวมีข้อกำหนดดังนี้ คือ ความหนาแน่น ตลอดจนสมบัติต่างๆ ของระบบมีค่าคงที่และไม่คิดพลังงานที่สูญเสียที่เกิดจากความหนืด สมมติฐานของแบบจำลองได้แก่ (1) การปล่อยก๊าซจะเกิดที่พื้นบริเวณที่อยู่ห่างจากผนัง ทำให้ผลการคำนวณต้องคูณ 2 เนื่องจากเป็นผลกระทบที่มลสารอาจจะถูกสะท้อนจากพื้นดิน (2) ระบบระบายอากาศในอาคารประกอบด้วยพัดลมระบายอากาศที่มีที่ครอบปิด (3) อาคารที่ทำการศึกษาเป็นรูปสี่เหลี่ยม (4) ความยาวและความกว้างของอาคารมีขนาดใหญ่มาก ทำให้ไม่ต้องคิดผลจากผนัง (wall effect) (5) เกิดการแพร่ได้ทุกทิศทาง (6) อุณหภูมิของระบบคงที่ (Isothermal) และ (7) ก๊าซที่ปล่อยมีแรงลอยตัว การวิเคราะห์ผลที่คำนวณได้จากการใช้แบบจำลอง ค่าความเข้มข้นของแก๊สธรรมชาติที่รั่วออกจากอาคารขนาดใหญ่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดได้จริง

นอกจากนี้ มีผู้นำทคนิค CFD โดยใช้แบบจำลอง PHOENICS ซึ่งอาศัยหลักการของ CFD มาหาการกระจายตัวของก๊าซ ซึ่งโปรแกรมนี้ประกอบด้วยชุดของสมการอนุรักษ์ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (mass conservation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservation) และสมการ

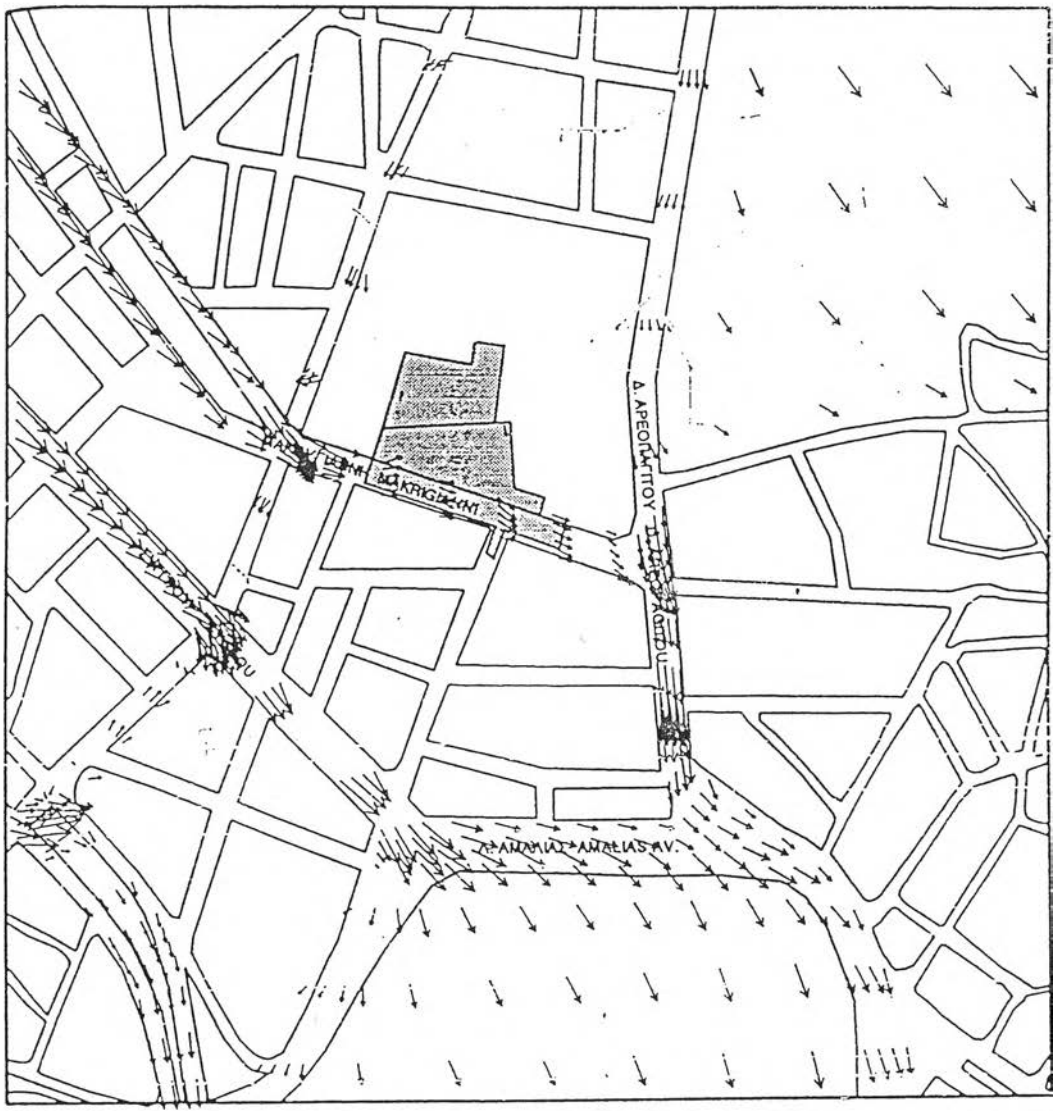
อนุรักษ์พลังงาน (energy conservation) นอกจากนี้ ถ้าระบบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence flow) จะใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาใช้ การคำนวณจะให้หลักการไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume) ตัวอย่างของงานวิจัยที่นำโปรแกรม PHOENICS มาใช้มีดังนี้

F. Haghighag, Z.Jiang, J.C.Y.Wang และ F.Allard (1992) ใช้เทคนิค CFD เพื่อหาก๊าซที่เจือปนในอากาศที่ระบายภายในอาคาร มีประโยชน์เพื่อทราบคุณภาพอากาศภายในอาคาร ตลอดจนทราบถึงอัตราการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งใช้ชุดสมการซึ่งประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน โดยกำหนดสภาวะเงื่อนไขและสภาวะเงื่อนไขขอบเขตอย่างเหมาะสม นอกจากนี้โปรแกรมนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประเมินหาการพาความร้อน และการกระจายตัวของมวลบริเวณภายในอาคารปิด โดยมีแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (k-ε model) ซึ่งใช้ได้ในบริเวณที่อยู่ห่างจากผนัง และใช้แบบจำลอง wall function เพื่อใช้ในบริเวณที่ก๊าซเคลื่อนที่ใกล้กับผนัง การคำนวณใช้หลักการไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume)

J.Panagopoulos, A.Karavannis และ N.C.Markatos (1995) เพื่อศึกษาผลกระทบของมลพิษทางอากาศ ณ สถานีรถไฟใต้ดิน ใจกลางเมืองเอเธนส์ ประเทศกรีก โดยใช้กริดแบบ Body Fitted Coordinate (BFD) เพื่อทำนายการกระจายตัวของมลสารในบริเวณภูมิประเทศแบบซับซ้อน โดยศึกษาก๊าซมลพิษที่เกิดมาจากยวดยานพาหนะและภาคจราจร โดยศึกษาในบริเวณที่มีการจราจรคับคั่ง ก๊าซที่ทำการศึกษาได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และสารระเหยได้ (VOC) ในบริเวณที่มีการไหลแบบปั่นป่วน พื้นที่ที่ต้องการศึกษามีขนาด 600x600 ตารางเมตร ใช้โปรแกรม CAD เพื่อเขียนแผนที่โดเมนที่ต้องการศึกษาลงในโปรแกรม PHOENICS

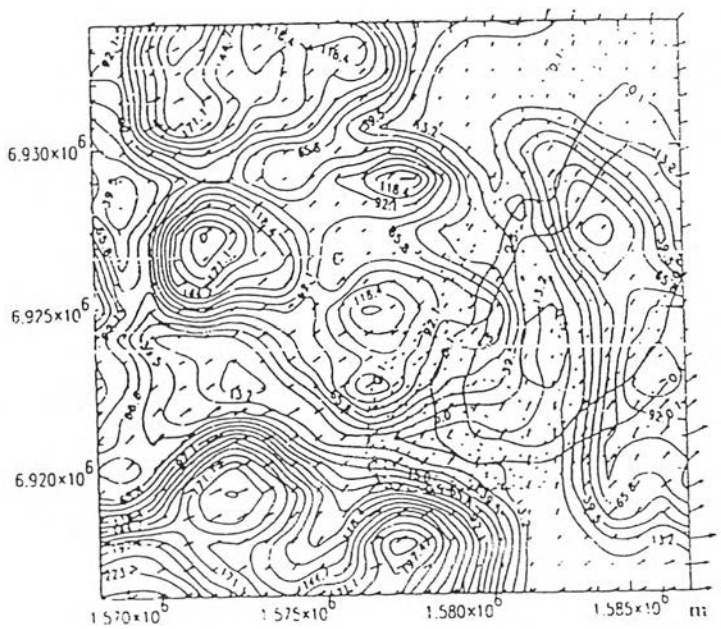
รูปแบบทั่วไปของสมการมีดังนี้ $div(\rho v\phi - \Gamma_\phi grad\phi = S_\phi$

ϕ คือ ตัวแปรอิสระที่ใช้ในสมการดิฟเฟอเรนเชียล ρ,V,Γ_ϕ และ S_ϕ คือ ความหนาแน่น เวกเตอร์ความเร็ว effective exchange ของตัวแปรอิสระ และพจน์ของแหล่งกำเนิดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรตามลำดับ เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)ใช้แบบ no-slip โดยแบ่งการคำนวณออกเป็นกริด 30x20x12 กริด วิธีการคำนวณแบบ SIMPLEST โดยใช้วิธีการคำนวณแบบซ้ำๆ (iteration) ทั้งหมด 1000 รอบ โดยใช้เวลาการคำนวณประมาณ 800 นาที จากรูปที่ 2.4 พบว่า บริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นมาก จะยิ่งมีปริมาณก๊าซมลพิษมาก พิจารณาจากความเร็วของก๊าซมลพิษที่มีอยู่หนาแน่นบริเวณสี่แยกของการจราจร



รูปที่ 2.4 แสดงความเร็วของก๊าซที่แพร่กระจายในบริเวณต่างๆ

Alexander Baklanov, Jan Burman และ Erik Naslund (1997) นำโปรแกรม PHOENICS version 2.0 มาใช้คำนวณการเคลื่อนที่และการแพร่ของก๊าซมลพิษ โดยใช้วิธีการสมการความเข้มข้นของออยเลอร์ (Eulerian Concentration equation) ในบริเวณภูมิประเทศแบบซับซ้อน ณ Sundsvall ประเทศสวีเดน และ Monchegorsk ประเทศรัสเซีย เพื่อศึกษาก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกจากโรงงานถลุงนิกเกิล สมการที่ใช้ได้แก่สมการอนุรักษ์ทั้ง 3 สมการดังที่กล่าวมาแล้ว รวมทั้งแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนโดเมนถูกสร้างโดยใช้ระบบ BFC ซึ่งสร้างภาพตามลักษณะภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบ เพื่อให้ใกล้เคียงกับภูมิประเทศตามจริงมากที่สุดและต้องใช้สมการไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic equation) มาคำนวณหาการกระจายตัวก่อน แล้วนำผลการคำนวณนี้มาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในสมการการกระจายตัว (Dispersion equation) หลักการของโปรแกรมใช้ ระบบ ไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume) ซึ่งเก็บค่าตัวแปรต่างๆ ตรงกลางเซล แต่เก็บตัวแปรของความเร็วที่ผนังกริด โดยโดเมนที่บริเวณ Sundsvall มีขนาด 20x20 ตารางกิโลเมตร แบ่งกริดออกเป็น 25x25 กริด โดยพิจารณาการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ด้วยอัตรา 1 กรัม/วินาที ในบริเวณกลางเมือง 800x2400 ตารางเมตร โดเมนบริเวณ Monohegorsk มีขนาด 10x15 ตารางกิโลเมตร ใช้กริด 20x30 กริด ผลการจำลองทั้ง 2 บริเวณเป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะภูมิประเทศ และความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ Sundvall ซึ่งเส้นทึบแสดงถึงความเข้มข้นที่ความสูงระดับ 3 เมตร และเส้นประแสดงถึงความเข้มข้นที่ความสูงระดับ 50 เมตร

นอกจากนี้ ในประเทศไทยมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบริเวณอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เช่น

Sawat Saengbangla et.al. (1981) ทำการศึกษาการกระจายความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยจากโรงไฟฟ้า และทำนายความเข้มข้นที่ระดับพื้นดินของก๊าซมลพิษรอบๆ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางโดยใช้แบบจำลอง VALLEY ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนามาจากหลักการการกระจายตัวของเกาส์เซียน (Gaussian Dispersion) ค่าที่คำนวณได้นี้ เป็นค่าความเข้มสูงสุดเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศของสารมลพิษทางอากาศที่ระบายออกจากแหล่งกำเนิดเดี่ยว ในพื้นที่ชนบทที่

มีลักษณะภูมิประเทศแบบซับซ้อน ในการศึกษานี้ ไม่ได้เปรียบเทียบค่าที่ประเมินกับค่าตรวจวัด แบบจำลอง VALLEY นี้เป็น Screening model ที่ US.EPA ใช้ในการประเมินค่าความเข้มข้นของสารมลพิษ แต่ค่าที่คำนวณมีแนวโน้มที่จะมากกว่าค่าที่ตรวจวัด (Over predict)

นอกจากนี้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ CALPUFF3 เพื่อประเมินความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระดับพื้นดินที่บริเวณอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยบริษัท ทีม คอนซัลติ้ง จำกัด, บริษัท System Application International (SAI) จำกัด และกรมควบคุมมลพิษ (1997) แบบจำลองนี้ถูกพัฒนามาจากหลักการ Gaussian Puff ได้พิจารณาสภาพการฟุ้งกระจายแบบ fumigation ซึ่งเป็นสภาพที่พบในแม่เมาะด้วย ในรายงานนี้ใช้แบบจำลอง CALMET ซึ่งเป็นแบบจำลองทางอุตุนิยม เพื่อคำนวณลักษณะอุตุนิยมก่อน และใช้เป็นข้อมูลอุตุนิยมวิทยาใน CALPUFF3 ในบริเวณแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผลการคำนวณที่ได้มากกว่าค่าที่ตรวจวัด